Untersuchungen über das Auftreten sekundärer Leuchterscheinungen in der Wasserstoff-Glimmentladung

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

genehmigt von der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn

vorgelegt am 24. Juni 1937 von

Erika Graf

aus Karlsruhe, Baden

1938

Druckerei und Verlag wissenschaftlicher Werke Konrad Triltsch, Würzburg-Aumühle

Hauptberichterstatter: Prof. Dr. W. Weizel.

Mitberichterstatter: Prof. Dr. Ch. Füchtbauer.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhaltsverzeichnis.

Einleitung 1

Experimentelles 3
Versuchsanordnung 3
Reinigung des Gases und der Elektroden 4
Einfluß der Vorbehandlung 5

Schaltung und Messung 5
Schaltschema 5
Meßvorgang und Versuchsparameter 6
Abgrenzung des Meßgebiets 6

Meßergebnisse und Diskussion 7
Brennspannungskurven und Sondencharakteristiken bei
a) verschiedenen Kathodenstromstärken 7
b) verschiedenem Druck des Füllgases 13
c) verschiedenem Abstand zwischen Kathode und Sonde 21

Entladungscharakteristiken der Hohlkathode 22

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546422_0095

In einer Glimmentladung unterscheidet man bekanntlich drei leuchtende Gebilde: Die erste Kathodenschicht, das negative Glimmlicht und die positive Säule. In vielen Fällen treten daneben aber noch andere sekundäre Leuchterscheinungen auf, die sehr verschiedene Formen annehmen können. Diese Tatsache ist schon lange bekannt; so sind beispielsweise in Fig. 1 einige solcher Leuchterscheinungen angedeutet [1]). Sie werden besonders in solchen Fällen beobachtet, wo die Entladung sich durch enge Schlitze oder Kanäle hindurchzwängt, oder wo auf andere Weise Einschnürungen der Entladungsbahn auftreten. Die Bedingungen für das Auftreten dieser Leuchterscheinungen lassen sich experimentell nur schwer erfassen, weil sie ihr Aussehen aus geringfügigen Ursachen oft merklich ändern und weil sie als Sekundäreffekte meist untrennbar von anderen Vorgängen in der Entladung überlagert sind, sodaß man sie nicht mit der wünschenswerten Reinheit herauspräparieren kann. Aus diesem Grunde werden all diese Er-

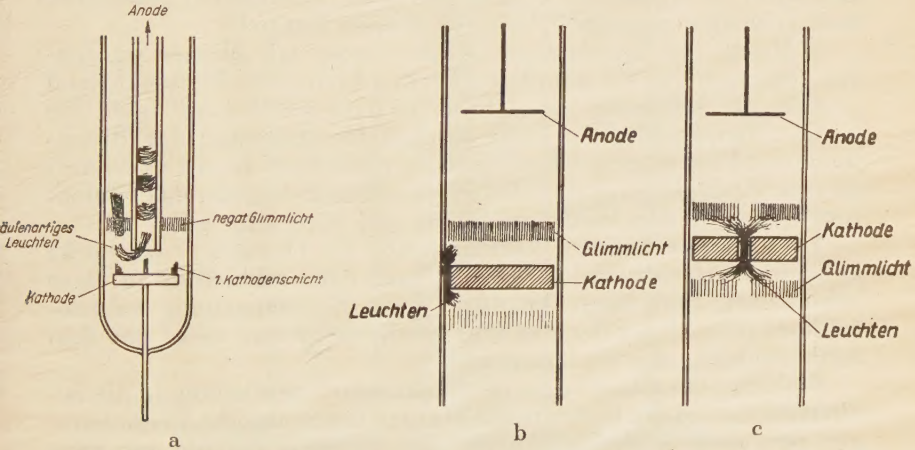


Fig. 1. Anormale Leuchterscheinungen beim Einschnüren der Entladungsbahn durch Glas- oder Metallwände.
a) Durchbrennen der positiven Säule durch das negative Glimmlicht, beobachtet von E. Wiedemann (Wied. Ann. **63**, 242, 1897).
b) u. c) Durchbrennen der Entladung durch Kanäle und Schlitze.

[1]) E. Wiedemann, Wied. Ann. **63**, 242, 1897; vgl. auch Handbuch der Physik Bd. XIV S. 191/92.

scheinungen in den meisten Fällen als unerwünschte Störeffekte angesehen und nach Möglichkeit unterdrückt. In der vorliegenden Arbeit wird der Versuch gemacht, den Mechanismus einiger merkwürdiger Entladungsgebilde aufzuklären, die bei Hohlkathodenentladungen auftreten und die ebenfalls zu der eben besprochenen großen Gruppe sekundärer Leuchterscheinungen gehören. Dieser Versuch erschien deshalb lohnend, weil die benutzte, geometrisch genügend scharf definierte Meßanordnung übersichtliche und reproduzierbare Verhältnisse gewährleistet und somit die Aussicht bestand, die Ursachen dieser Vorgänge aufzuklären und die Gesetzmäßigkeiten ihres Ablaufs zu erfassen.

Als „Hohlkathode" wird ganz allgemein eine Kathode bezeichnet, deren Oberfläche konkav ist, bei der also die Bahnen der aus ihr austretenden Elektronen konvergent verlaufen, z. B. ein Hohlzylinder oder ein Becher. Ähnliche Verhältnisse kann man auch dadurch erreichen, daß man die Kathode aus mehreren einander gegenüberstehenden Einzelteilen zusammensetzt, im geometrisch einfachsten Fall aus zwei parallelen Platten. Diese Hohlkathoden zeigen in der Entladung beim Übergang von großen zu immer kleineren Drucken folgendes Verhalten:

1. Bei großem Druck — oder bei großen Dimensionen der Hohlkathode [2]) — ergibt sich kein wesentlicher Unterschied gegenüber dem Verhalten einer gewöhnlichen ebenen Kathode.

2. Mit kleiner werdendem Druck — oder mit kleiner werdenden Dimensionen, bei parallelen Platten kleinerem Plattenabstand — tritt die bekannte „Hohlkathodenwirkung" auf: Sie besteht hauptsächlich in einer starken Herabsetzung der Brennspannung bzw. einer größeren Stromergiebigkeit. Damit verknüpft ist eine Verkleinerung der Hittorfschen Dunkelräume; das Glimmlicht kriecht in den Hohlraum hinein und wird sehr hell.

3. Bei immer weiterer Verkleinerung des Druckes — oder sehr kleinem Plattenabstand — gelangt man dann schließlich zu einer behinderten Entladung, die durch hohe Brennspannung gekennzeichnet ist und bei der das Glimmlicht mehr und mehr aus dem Kathodenhohlraum verdrängt wird.

Während des Überganges der Hohlkathodenentladung in die behinderte Entladung treten mannigfaltige eigentümliche Erscheinungen der oben beschriebenen Art auf. Speziell für die aus zwei parallelen Platten bestehenden Hohlkathoden ist die Ausbildung von heller leuchtenden Zonen im negativen Glimmlicht charakteristisch; die Farbe des Glimmlichts nähert sich dabei immer mehr der Farbe der positiven Säule. Diese Erscheinung der Ausbildung von heller leuchtenden Zonen im negativen Glimmlichte wird im

[2]) Relativ zur Dunkelraumdicke.

folgenden in Abhängigkeit von der Form der Hohlkathode (Abstand der parallelen Platten), vom Gasdruck und von der Stromdichte für die Wasserstoffglimmentladung im einzelnen experimentell untersucht.

Experimentelles.

Die Versuche wurden mit der in Fig. 2 dargestellten Anordnung ausgeführt. Sie besteht aus zwei kreisförmigen Messingplatten, die in wählbarem Abstand einander gegenüberstehen und so eine „Hohlkathode" von variablen geometrischen Eigenschaften bilden. Man kann ferner durch Variation des Potentials der nur einen Platte verschiedenartige Eingriffe in die kathodischen Entladungsteile vornehmen. Die Seiten- und Rückflächen der Platten sind

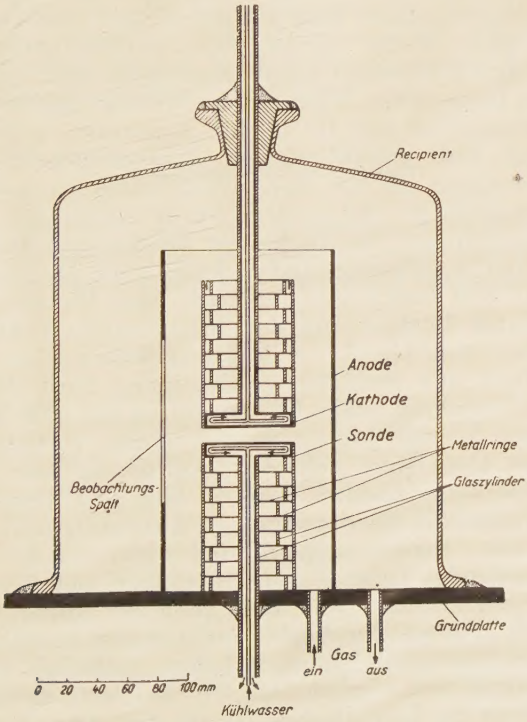


Fig. 2. Maßstäbliche Skizze der Versuchsanordnung (schematisch!)
Metall: Glas: Kittung:

durch einen Aufbau von Glaszylindern und Metallringen geschützt, sodaß die Entladung nur an den beiden Stirnflächen ansetzen kann. Um störende Temperatureffekte zu vermeiden, sind die beiden Elektroden hohl gearbeitet und werden durch fließendes Wasser gekühlt [3]). Als Anode dient ein Messingzylinder, der die beiden Platten umgibt und einen schmalen Längsspalt zur Beobachtung der Leuchterscheinungen besitzt. Die Stromzufuhr zur Anode erfolgt über eine Grundplatte aus Messing, welche den Anodenzylinder trägt. In der Mitte dieser Grundplatte befindet sich eine Bohrung, durch welche das Zuleitungsrohr der einen Kathodenplatte isoliert hindurchgeführt ist. Die ganze Anordnung befindet sich unter einem Rezipienten, durch den von oben her die Zuleitung der zweiten Kathodenplatte vakuumdicht hindurchgeführt ist.

Das Versuchsrohr wird durch eine Entladung gereinigt, da eine Ausheizung im Ofen bei der gewählten Anordnung nicht durchführbar ist; hierbei werden die Elektroden in strömendem Gas abwechselnd als Kathode und als Anode mit starkem Strom belastet. Auf diese Weise werden die Verunreinigungen aus der Oberfläche der Elektroden herausgeschlagen und von dem strömenden Gas fortgespült. Während des Reinigungsprozesses zirkuliert der Wasserstoff ständig in der Apparatur, wobei in einem durch flüssige Luft gekühlten Kohleabsorptionsgefäß die mitgeführten Fremdgase (N_2, O_2 usw.) festgehalten werden. Hahnfettdämpfe, Quecksilber und andere Verunreinigungen werden in U-röhren ausgefroren, die in beiden Zuleitungen zum Rezipienten liegen, und mit flüssiger Luft gekühlt sind. Der Reinheitsgrad von Füllglas und Elektroden läßt sich nach Weizel und Fischer (loc. cit.) durch Beobachtung der Brennspannung kontrollieren: Bei festgehaltenen Druck- und Stromstärkewerten strebt die Brennspannung mit fortgesetzter Reinigung nach dem oben beschriebenen Verfahren einem Grenzwert zu, der auch nach absichtlicher starker Verunreinigung immer wieder erreicht wird; der durch diesen Grenzwert definierte reproduzierbare Endzustand gestattet zwar keine absolute Aussage über den Reinheitsgrad, er stellt aber jedenfalls einen geeigneten Ausgangspunkt für weitere Messungen dar. Spektroskopisch sind schon vor der Erreichung dieses Endzustandes keine Verunreinigungen mehr nachzuweisen.

Über die eben beschriebene Reinigung der Apparaturteile hinaus war noch eine weitere Vorbehandlung des Versuchsrohrs notwendig. Aus Unstimmigkeiten zwischen mehrfach wiederholten Messungen ergab sich nämlich, daß die Meßwerte davon abhingen, was kurz zuvor im Entladungsraum vor sich ging. Versuche über

[3]) Die Anordnung gleicht in wesentlichen Zügen der von Weizel und Fischer (Ann. d. Phys. **24**, 209, 1935) angegebenen.

Einschaltvorgänge nach verschiedener Vorbehandlung lassen vermuten, daß sowohl die Kathode als auch hauptsächlich die Anode in der Entladung ihre Oberflächenbeschaffenheit — wahrscheinlich ihre Gasbeladung — ändern, und daß diese Veränderungen über einige Zeit bestehen bleiben. Besonders das Auftreten der Anodenglimmhaut und damit eine Brennspannungserhöhung von etwa 15 bis 20 Volt hängt von der Vorbehandlung stark ab. Um Störungen durch Unterschiede in der „Vorgeschichte" zu vermeiden, wurde die Kathode und die ihr gegenüberstehende Platte vor dem Versuch möglichst gleichartig behandelt: Vor der Aufnahme jedes Meßpunktes wurde die Entladung mindestens eine Minute lang mit einer Stromstärke von 600 mA gebrannt, wobei die beiden Platten gegenüber Anode sich auf gleichem Potential befanden. Hierdurch ist der Einfluß der Vorbehandlung zwar nicht ausgeschaltet, es ist aber dafür gesorgt, daß die Vorbehandlung in einer ganz bestimmten, übersichtlichen Weise erfolgt. Für die Meßpunkte, bei denen die der Kathode gegenüberliegende Platte isoliert war oder auf Anodenpotential lag, wurde in dieser Weise bis zu 5 Minuten vorbehandelt, da hier die einseitige Belastung der Kathodenplatte am stärksten ausgeprägt ist [4]).

Schaltung und Messung.

Die Schaltung zeigt Fig. 3. Als Spannungsquelle dient ein Hochspannungsgenerator, dessen Klemmenspannung regelbar ist. Der positive Pol ist über einen Schutzwiderstand R_1 mit dem Anoden-

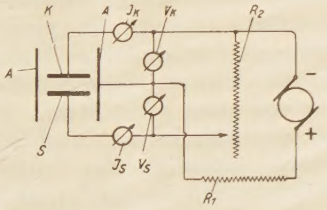


Fig. 3. Schaltskizze.

zylinder A, der negative Pol mit der Kathode K verbunden. Das Potential der der Kathode gegenüberstehenden Platte S, genannt

[4]) Die hier zu untersuchenden Leuchterscheinungen treten natürlich auch bei anderer Vorbehandlung auf, nur verschiebt sich dann der Druck- und Stromstärkebereich, in welchem sie auftreten.

Sonde [1]), kann durch den Regelwiderstand R_2 zwischen dem Potential der Kathode und dem der Anode variiert werden [2]). Die Spannung zwischen der Sonde bzw. zwischen der Kathode und der Anode kann an zwei Voltmetern, die Ströme zwischen der Sonde bzw. der Kathode und der Anode an zwei Amperemetern mit einer Genauigkeit von etwa 1 bis 2% abgelesen werden.

Der Meßvorgang selbst ist folgender: Die Spannung V_S zwischen Sonde und Anode wird stufenweise variiert und für jeden Spannungswert die zugehörige Brennspannung V_K und der Sondenstrom I_S abgelesen; hierbei wird der Strom I_K zur Kathode, der an dem Verhalten der hier untersuchten kathodischen Entladungsgebilde maßgeblich beteiligt ist, immer auf den gleichen Wert einreguliert, in bewußtem Gegensatz zur üblichen Meßmethodik, bei der der Anodenstrom konstant gehalten wird. Diese Meßwerte liefern einerseits durch Auftragung der Brennspannung V_K (Ordinate) über der Sondenspannung V_S (Abszisse) die Brennspannungskurve und andererseits durch Auftragung des Sondenstroms I_S über V_S die „Sondencharakteristik". Als Parameter treten bei diesen Messungen auf:

a) Die Kathodenstromstärke I_K,
b) der Druck p des Füllgases (gemessen mit Mc Leod),
c) der Abstand a zwischen Sonde und Kathode.

Die sich dabei ergebenden Scharen von zusammengehörenden Brennspannungskurven und Sondencharakteristiken bilden das wesentliche experimentelle Material der vorliegenden Arbeit und sind in den Figuren 4—10 niedergelegt [3]).

Vor der endgültigen Durchführung dieser Hauptmessungen wurde durch Vorversuche geprüft, bei welchen Plattenabständen, Drucken und Stromstärken jenes Übergangsstadium zwischen Hohlkathodenentladung und behinderter Entladung gut nachweisbar auftritt. Für den Abstand zwischen Sonde und Kathode ergab sich dabei ein Bereich von etwa 7 bis 20 mm. Bei größeren Plattenabständen als 20 mm wird der Druck- und Stromstärkebereich, in dem das erwähnte Zwischenstadium der Entladung auftritt, immer kleiner, während bei kleineren Abständen als 7 mm die Entladung schon stark behindert ist. Bei 20 mm Abstand bildet sich die gesuchte Entladungsform für Drucke von 0,27 bis 1,1 mm Hg und Kathodenstromstärken von 20 bis 5 mA aus. Bei 10 mm Abstand

---

[1]) Die Platte S hat im größten Teil des untersuchten Bereichs die Funktion einer Sonde.

[2]) Anodenpotential an der Sonde S wird durch Unterbrechung der Leitung nach R_2 und direkte Verbindung mit der Anode hergestellt.

[3]) Es ist im folgenden nicht das insgesamt vorliegende experimentelle Material wiedergegeben, um die Übersicht nicht unnötig zu erschweren.

findet man einen langsamen Übergang von der Hohlkathodenentladung zur behinderten Entladung in einem ziemlich weiten Druck- und Stromstärkebereich gut ausgeprägt. Die Hauptmessungen wurden deshalb bei Abständen von 10 bzw. 20 mm durchgeführt.

Meßergebnisse und Diskussion.

a) Verschiedene Kathodenstromstärken.

Um uns einen Überblick über die auftretenden Erscheinungen zu verschaffen, beobachten wir zunächst einmal rein visuell das Verhalten der Entladung für 1 mm Druck, 10 mm Plattenabstand und 100 mA Kathodenstromstärke bei steigendem negativem Potential an der Sonde. Bei Sondenspannungen von einigen Volt bildet sich vor der Sonde ein schmaler Dunkelraum aus, der bei Vergrößerung der Sondenspannung sich allmählich ausdehnt. Zwischen diesem Sondendunkelraum und dem Kathodendunkelraum verbleibt eine gleichmäßig von negativem Glimmlicht erfüllte Schicht. Dieses Bild ändert sich dann bei weiterer Erhöhung des Sondenpotentials bis auf Kathodenpotential (Hohlkathode) nicht mehr wesentlich. Merklich andere Erscheinungen treten aber auf, wenn wir den gleichen Versuch für 20 mA Kathodenstrom wiederholen. Jetzt ist für Sondenspannungen von wenigen Volt k e i n Dunkelraum vor der Sonde erkennbar; für etwas größere Sondenspannung wird die Entladung instabil, bis sich bei 21 Volt eine neue stabile Entladungsform ausgebildet hat: Das Glimmlicht hat sich unterteilt, es ist ein leuchtender Ring entstanden, dessen Radius etwa mit dem der Platten übereinstimmt. Die Farbe dieses Ringes ist im Gegensatz zum Glimmlicht mehr rötlich, besonders bei weiterer Steigerung der Sondenspannung, sie nähert sich also mehr und mehr der Farbe der positiven Säule[1]). Ein Beispiel für Ringbeobachtung der eben beschriebenen Art gibt das Versuchsprotokoll in Tabelle 1, in welchem gleichzeitig auch die zugehörigen Meßdaten für die Größen V_S, V_K und I_S wiedergegeben sind. Wie die weitere Betrachtung von Tabelle 1 zeigt, können bei steigendem Sondenpotential V_S auch mehrere Ringe auftreten; hierbei ist bemerkenswert, daß in letzterem Fall immer der Ring am hellsten ist, dessen Durchmesser etwas kleiner ist als der Durchmesser der Platten; dieser hellste Ring neigt am stärksten zur rötlichen Farbe der positiven Säule, während die übrigen Ringe im wesentlichen noch die mehr bläuliche Farbe des Glimmlichts zeigen.

---

[1]) Auch die Struktur des Ringes (halbmondförmiger Querschnitt mit der konkaven Seite zur Anode hin) erinnert an die Struktur der Schichten in der positiven Säule.

Tabelle 1.

Versuchsprotokoll für

Druck 1 mm, Plattenabstand 10 mm, Kathodenstromstärke 20 mA.

V_K Volt	V_S Volt	I_S mA	I_S/I_K %	Leuchterscheinungen	Bemerkungen
					Vorbehandlung:
433	0,08	—11,6	—58	Glimmlichtschicht	5 Min. Hohlkath.
434	2,61	—4,75	—23,75	„ „	mit 300 mA.
435	3,21	—4,25	—21,25	„ „	2 Min. „ „
450	22,6	—1,47	—7,35	1 Ring ganz außen	5 „ „ „
450	24,9	—0,33	—1,65	1 Ring ganz außen	5 „ „ „
453	39	+2,59	+12,95	2 Ringe	2 „ „ „
456	47,1	3,65	18,25	2 Ringe, der innere	2 „ „ „
457	59,4	5,3	26,5	2 Ringe wird breiter,	2 „ „ „
455	69	6,75	33,7	2 Ringe seine Öffnung kleiner.	10 Min. Druck reg. 2 Min. Vorbeh.
449	96	9,9	49,5	außen 1 Ring, innen Glimmlichtschicht	2 „ „
436	122,1	12,6	63	außen 1 Ring, innen Glimmlichtschicht	1 „ „
426	138,4	13,9	69,5	3 Ringe	1 „ „
413,5	156	15,1	75,5	4 Ringe	1 „ „
406	167	15,8	79	4 Ringe, innerste Öffnung zieht	2 „ „
398	180	16,3	81,5	4 Ringe sich zusammen.	1 „ „
384	203	17,0	85	3 Ringe, flackern etwas	1 „ „
					usw.
375	218	17,6	88	3 Ringe, flackern stark	Bei mehreren Ringen
365	236	18,1	90,5	3 Ringe „ „	ist immer der etwa
353,5	255	18,7	93,5	3 Ringe „ „	2—5 mm vom Band
348	265	19,0	95	3 Ringe „ „	der Elektrode nach
343	274	19,2	96	3 Ringe „ „	innen liegende am
					hellsten.
336	283	19,5	97,5	2 Ringe, flackern	
329	293	19,7	98,5	2 Ringe, werden breiter und rücken	
325	300	20,0	100	2 Ringe nach innen.	
321	305	20,2	101	2 Ringe „ „	
316	310	20,4	102	2 Ringe, der innere ist unscharf und	
311	316	20,5	102,5	2 Ringe zittert.	

Diese Änderungen in den Leuchterscheinungen lassen sich zum Teil auch im elektrischen Verhalten der Entladung nachweisen. Betrachten wir zuerst den Verlauf der Brennspannungskurve und der Sondencharakteristik für 100 mA Kathodenstrom in Fig. 4a und 4b. Die höchste Brennspannung von 720 Volt ergibt sich, wenn die Sonde auf Anodenpotential liegt ($V_S = 0$). Die Sonde nimmt hierbei 34% des Anodenstroms auf, wie der Verlauf der zugehöri-

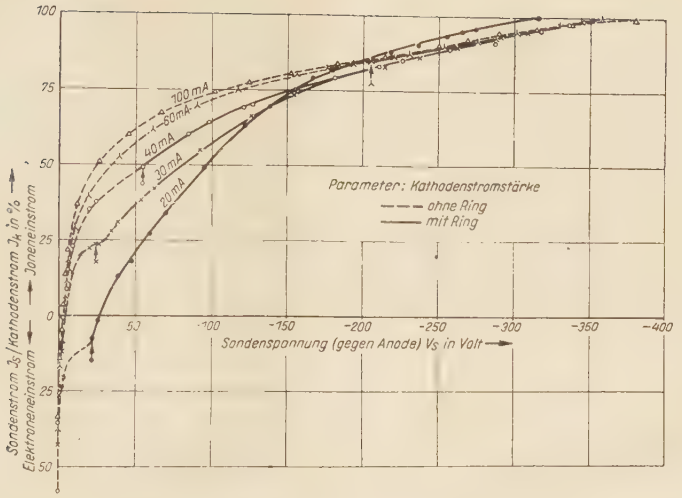
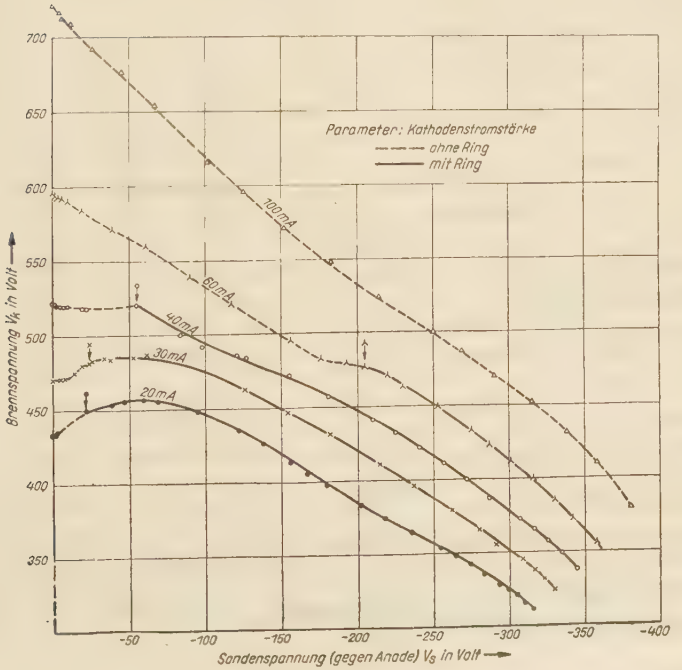


Fig. 4. a) Sondencharakteristiken
b) Brennspannungskurven
für verschiedene Kathodenstromstärken
Druck: 1 mm Hg, Plattenabstand: 10 mm



gen Sondencharakteristik zeigt. Wir legen jetzt an die Sonde wachsende negative Potentiale: Die Brennspannung sinkt ab (beginnende Hohlkathodenwirkung). Der Einstrom zur Sonde zeigt keine Besonderheiten; er wird schon bei einigen Volt negativer Sondenspannung positiv und steigt zunächst schnell und dann immer langsamer auf den Wert des Kathodenstroms an.

Betrachten wir demgegenüber den Verlauf der Brennspannungskurve für 20 mA Kathodenstrom. Hier üben kleine negative Sondenspannungen einen der Hohlkathodenwirkung entgegengesetzten Einfluß auf die Brennspannung aus; die Brennspannung wächst anfänglich mit steigender Sondenspannung um etwa 20 Volt, um erst für Sondenspannungen über 70 Volt wieder abzufallen und damit in den „normalen" Verlauf (Verhalten bei 100 mA) überzugehen. Der überraschende Anstieg der Brennspannungskurve bei kleineren Sondenpotentialen fällt zusammen mit der Ausbildung der ringförmigen Leuchtzone [2]), was sich in der Sondencharakteristik noch deutlicher markiert: Die Sondencharakteristik für 20 mA besitzt in dem Bereich einen Wendepunkt, wo sich im Glimmlicht ein Ring ausbildet (Pfeil), im Gegensatz zu dem gleichförmigen Anstieg der Sondencharakteristik bei 100 mA Kathodenstrom. Weitere Unterteilungen des Glimmlicht in mehrere Ringe machen sich dagegen in den Brennspannungskurven und Sondencharakteristiken nicht mehr bemerkbar.

Bei Kathodenstromstärken von 30, 40 und 60 mA findet man Übergänge von dem soeben beschriebenen anormalen Verhalten bei 20 mA zu dem „normalen" Verhalten bei 100 mA. Insbesondere kann man bei etwas größeren Strömen mit kleinen Sondenspannungen zuerst einen Dunkelraum vor der Sonde erzeugen, bevor sich mit weiterem Anwachsen der Sondenspannung Ringe ausbilden: Der Umschlag in die Ringentladung verlagert sich mit wachsender Stromstärke zu höheren Sondenspannungen; außerdem wird die Erhöhung der Brennspannung mit zunehmender Kathodenstromstärke kleiner [3]).

Im folgenden sei der Versuch gemacht, eine Erklärung für diese Beobachtungen zu geben. Wenn die Sonde mit der Anode parallel

---

[2]) Durch einen Pfeil ist jeweils der erste Meßpunkt gekennzeichnet, bei dem ein Ring beobachtet wurde. Diese Stelle bedeutet nicht genau den Einsatz der anderen Entladungsform, da die Entladung in diesem Bereich ja unstabil ist.

[3]) Bei 60 mA Kathodenstromstärke findet der Umschlag in die Ringentladung erst bei einer Sondenspannung von 205 Volt statt. In der Brennspannungskurve tritt dabei kein Maximum mehr auf, sondern es ist nur noch ein deutlicher Absatz im Kurvenverlauf festzustellen. Auch bei der Sondencharakteristik macht sich die Änderung der Entladungsform kaum noch bemerkbar, da wir uns in diesem Falle schon in dem sehr flach verlaufenden Teil der Kurve befinden.

geschaltet ist ($V_S = 0$), können die Elektronen sich sowohl zur Sonde als auch zur Anode begeben. Bei allen Meßreihen zeigt sich, daß ein erheblicher Prozentsatz zur Sonde wandert [4]) (Ordinate bei $V_S = 0$ in den Sondencharakteristiken). Durch Anlegen von Sondenspannungen werden zunächst die langsamen Elektronen von der Sonde ferngehalten und müssen zur Zylinderanode wandern. Diese Wanderung findet im negativen Glimmlicht statt und muß parallel zur Kathode und Sonde, also radial erfolgen. Um eine größere Anzahl von Elektronen zu zwingen, diesen Querweg einzuschlagen, ist ein radiales Feld nötig. Ein zusätzliches radiales Feld ist auch noch deshalb erforderlich, weil das Glimmlicht, in dem die Elektronen wandern, durch die Ausbildung des Sondendunkelraums eingeengt wird. Außerdem steht den langsamsten Elektronen, die vor allem zur Anode wandern müssen, nicht einmal der volle vom Glimmlicht erfüllte Raum, sondern nur ein Teil dieses Raums zur Verfügung; denn der dem Sondendunkelraum unmittelbar vorgelagerte Teil des Glimmlichts ist zwar den schnellen, nicht aber den langsamen Elektronen zugänglich.

Durch diese Vorgänge muß die Brennspannung erhöht werden, da sie nicht nur dazu dient, die kathodischen Entladungsteile aufzubauen, sondern auch die radiale Wanderung der Elektronen zu ermöglichen. In dem zwischen Kathode und Sonde liegenden Glimmlicht bleibt daher bei wachsender Sondenspannung das Potential in radialer Richtung nicht mehr konstant sondern wächst nach außen. Dieser Potentialanstieg zeigt sich auch in der Ergiebigkeit der verschiedenen Teile der Kathodenoberfläche; es herrscht in der Randzone, wo der Kathodenfall annähernd gleich der Brennspannung ist, eine höhere Stromdichte als in der Mitte der Kathode, wo der Kathodenfall merklich niedriger ist als die Brennspannung.

Wird das Querfeld stärker (größere Sondenspannungen), so erreichen die darin radial wandernden Elektronen Energien, die sie zu Stoßanregungen und Stoßionisationen befähigen. Im negativen Glimmlicht finden dann außer den Prozessen, die dort normalerweise häufig sind, noch zahlreiche Anregungen und Ionisationen durch mäßig schnelle Elektronen statt, d. h. Vorgänge, wie man sie sonst in der positiven Säule einer Entladung beobachtet: Dem negativen Glimmlicht überlagert sich in radialer Richtung eine Art Säule. Genau wie in der Säule selbst findet eine Unterteilung in mehr oder minder stark leuchtende Schichten statt (Auftreten von

[4]) Der gemessene Elektroneneinstrom für $V_S = 0$ gibt allerdings nicht den gesamten Elektronenstrom wieder, da auf die Sonde, auch wenn sie auf Anodenpotential liegt, beträchtliche Ionenströme fließen (vgl. Weizel und Fischer loc. cit.).

Ringen), genau wie dort werden Elektronen und Ionen zusätzlich erzeugt. Hierdurch wird der weitere Anstieg der Brennspannung unterbrochen oder wenigstens vermindert, gleichzeitig treffen auf die Sonde eine größere Zahl von Ionen auf. Dies erklärt den wieder steiler werdenden Anstieg des Sondenstroms beim Auftreten der Ringe. Bei weiterem Anwachsen der Sondenspannung wird die Unterteilung des Glimmlichts immer deutlicher, wobei die leuchtenden Zonen immer mehr die für die positive Säule charakteristische rötliche Farbe annehmen.

Die bisherigen Überlegungen bezogen sich auf den Fall, bei dem die Ausbildung leuchtender Zonen im negativen Glimmlicht sich auch in der Brennspannungskurve und in der Sondencharakteristik deutlich bemerkbar macht (20 mA-Kurven in Fig. 4 a, b). Zur Deutung auch der übrigen Kurven bei 30, 40, 60, 100 mA müssen die Veränderungen geklärt werden, die sich beim Übergang zu größeren Kathodenstromstärken an diesen Kurven bemerkbar machen:

a) Das allmähliche Verschwinden der Unregelmäßigkeiten in den Brennspannungskurven und Sondencharakteristiken.

b) Die Verlagerung dieser Unregelmäßigkeiten nach höheren Sondenspannungen hin.

Zu a) Mit größer werdender Kathodenstromstärke steigen auch die Trägerdichten n im Glimmlicht an, und damit nimmt die Dicke d des Sondendunkelraums zunächst gemäß dem Langmuir-Schottkyschen Gesetz

$$n \cdot e \cdot v = j = \text{const.} \frac{U^{3/2}}{d^2} \quad \text{ab.}$$

Der Sondendunkelraum d wird also bei gleicher Sondenspannung U umso schmaler sein, je höher die Kathodenstromstärke ist [5]). Mit steigender Kathodenstromstärke wird infolgedessen das Glimmlicht durch die beiden Dunkelräume vor der Kathode und der Sonde immer weniger eingeengt und damit ist ein immer schwächeres Querfeld notwendig, um die langsamen Elektronen zur Anode abzuführen. Die Unregelmäßigkeiten, deren Auftreten nach dem weiter oben gesagten unmittelbar an das Vorhandensein des Querfelds gebunden ist, werden also bei wachsender Stromstärke immer weniger ausgeprägt sein, und schließlich bei genügend großen Stromstärken völlig verschwinden. Dieses im elektrischen Verhalten deutlich erkennbare allmähliche Verschwinden der Unregel-

[5]) Die durch obiges Gesetz gegebene Beziehung gilt quantitativ allerdings nur für kleine Sondenspannungen und kleine Sondendimensionen; die Dicke des Sondendunkelraums kann natürlich nicht über die Dicke des Kathodendunkelraums anwachsen, wenn das Sondenpotential zwischen Anodenpotential und Kathodenpotential variiert wird.

mäßigkeiten [6]) scheint nach den visuellen Beobachtungen der Ringe nicht so kontinuierlich vor sich zu gehen, im Gegenteil sind die Ringe für größere Kathodenstromstärken wesentlich besser ausgeprägt; wahrscheinlich beruht dies aber auf mehr sekundären Ursachen, wie z. B. auf der Zunahme der Gesamthelligkeit im Glimmlicht beim Übergang zu höheren Kathodenstrostärken oder auf der verschiedenen Empfindlichkeit des Auges für relative Helligkeitsunterschiede bei verschiedener Gesamthelligkeit, oder schließlich auf dem verschiedenen Helligkeitseindruck andersfarbigen Lichtes.

Zu b) Die Betrachtung des Langmuir-Schottky'schen Gesetzes ergibt ferner: Will man bei wachsender Stromstärke die Dicke des Sondendunkelraums in seiner Größe etwa konstant halten [7]), so muß man immer höhere Potentiale an die Sonde anlegen. Um den Glimmlichtbereich, in welchem die Elektronen zur Anode wandern, bei den verschiedenen Kathodenstromstärken in etwa gleicher Weise einzuengen, und damit ähnliche Bedingungen für das Auftreten stärkerer Gradienten, also leuchtender Zonen (Ringe) zu schaffen, wird man demnach immer höhere negative Potentiale an die Sonde anlegen müssen. Dies ist der Grund dafür, daß sich das Auftreten der Unregelmäßigkeiten in den Kurven der Fig. 4 a, b beim Übergang zu höheren Kathodenstromstärken nach immer größeren Sondenspannungen hin verlagert. Zu denselben Ergebnissen führen Überlegungen, bei denen man den Raum zwischen Kathode und Sonde zu der positiven Säule in Parallele setzt: Bei Vergrößerung der Stromstärke wird der Spannungsbedarf der Säule (negative Charakteristik der Säule) kleiner, woraus ebenfalls das Wegfallen der Unregelmäßigkeiten bei größeren Stromstärken folgt.

b) Verschiedener Druck des Füllgases.

Wir wenden uns jetzt den Messungen bei anderen Drucken zu und betrachten zunächst die Brennspannungskurven und Sondencharakteristiken bei 2 mm Druck und verschiedenen Kathoden-

---

[6]) Auch der immer steilere Abfall der Brennspannungskurven mit steigender Kathodenstromstärke (zunehmende Hohlkathodenwirkung) wirkt sich in dem gleichen Sinne, nämlich in einer wachsenden Überdekkung der Unregelmäßigkeiten aus.

[7]) Dies ist natürlich nur innerhalb eines gewissen Stromstärkebereichs möglich (vgl. Anm. 5 auf S. 12)!

stromstärken, die in Fig. 5 a und b wiedergegeben sind. Beim Vergleich der Brennspannungskurven für 2 mm Druck (Fig. 5 b) mit den bereits ausführlich besprochenen Brennspannungskurven bei

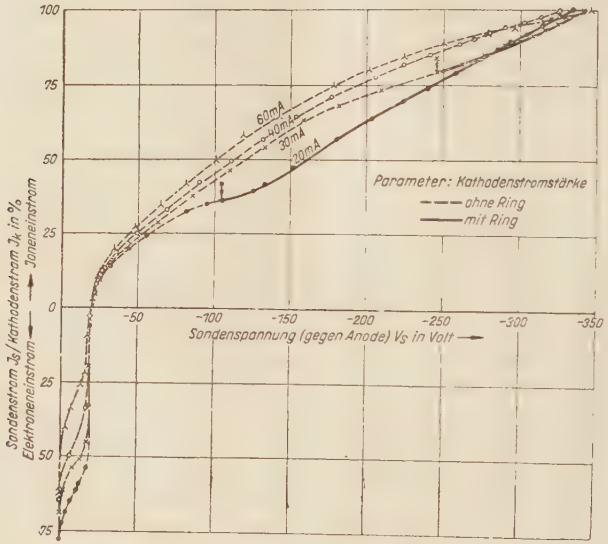
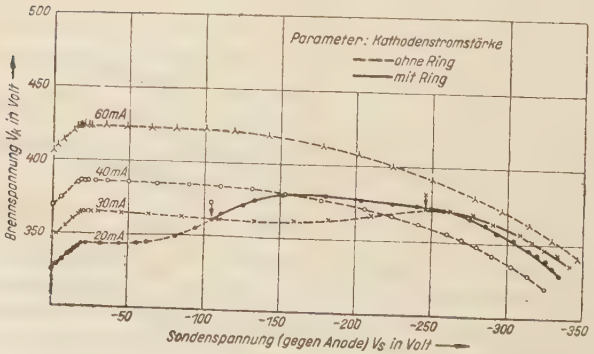


Fig. 5. a) Sondencharakteristiken
b) Brennspannungskurven
für verschiedene Kathodenstromstärken
Druck: 2 mm Hg, Plattenabstand: 10 mm



1 mm Druck (Fig. 4b) fällt zunächst der geradlinige Anstieg unter 45° bei kleinen Sondenspannungen auf, der für alle Kathodenstromstärken mit Ausnahme der 100 mA-Kurve auftritt, und bei der scharf definierten, für alle Kurven gleichen Sondenspannung (von 19 Volt) in einen horizontalen Kurventeil übergeht. Die Gründe für das Auftreten dieses linearen Brennspannungsanstiegs sollen kurz geklärt werden, bevor wir den weiteren Verlauf der Kurven in Fig. 5 diskutieren, der in diesem Zusammenhang hauptsächlich interessiert. Aus den zugehörigen Sondencharakteristiken (Fig. 5a) geht hervor, daß bis zu der Sondenspannung von 19 Volt noch überwiegend Elektronen in die Sonde einströmen. Gleichzeitig kann man bei Erhöhung der Sondenspannung bis auf 19 Volt vor der Anode eine immer heller leuchtende blaue Schicht wahrnehmen, deren Helligkeit sich dann bei weiterer Steigerung der Sondenspannung nicht mehr ändert. Da die Brennspannung und die Sondenspannung gleichzeitig um jeweils gleiche Beträge ansteigen (die Neigung der Geraden ist 45°!), muß die Ursache für diesen Anstieg in einem Teil der Entladungsstrecke gesucht werden, der sowohl dem Kathoden- als auch dem Sondenstromkreis angehört, d. h. zwischen Glimmlicht und Anode: Es handelt sich offenbar um das Auftreten eines Anodenfalls, dessen Ausbildung bei einer Größe von 19 Volt beendet ist. Daß dieser Anodenfall erst beim Übergang zu höheren Drucken sich ausbildet, ist durchaus verständlich; die Druckerhöhung auf das Doppelte ist nämlich nach den Ähnlichkeitsgesetzen gleichbedeutend mit einer Verdoppelung der Dimensionen der Entladungsstrecke: Die Anode ist jetzt bei 2 mm Druck vom Glimmlicht sozusagen doppelt so weit entfernt als vorher bei 1 mm Druck; nach Güntherschulze [8]) ist somit die Möglichkeit für die Ausbildung eines Anodenfalls gegeben. Die Größe dieses Anodenfalls müssen wir in Rechnung setzen, denn wir interessieren uns bei den vorliegenden Untersuchungen für die Potentialverteilung im negativen Glimmlicht und ihre Beeinflussung durch verschiedene Sonden-Potentiale, messen aber das Potential von Kathode und Sonde gegen Anodenpotential. Tritt kein Anodenfall auf (z. B. bei 1 mm Druck), so können wir das Potential der peripheren Teile des Glimmlichts mit dem Anodenpotential praktisch gleichsetzen; bei 2 mm Druck dagegen, wo ein Anodenfall auftritt, müssen wir die Kurven entsprechend verschieben, sodaß wieder die gemessenen Spannungen auf das Potential des Glimmlichtrandes bezogen sind. Erst dann lassen sich zahlenmäßige Vergleiche mit den übrigen Messungen durchführen. Ein Beispiel zeigt Fig. 6a, wo die 2 mm-Kurve aus Fig. 5a auf diese Weise

[8]) A. Güntherschulze, Zs. f. Phys. **30**, 175, 1924.

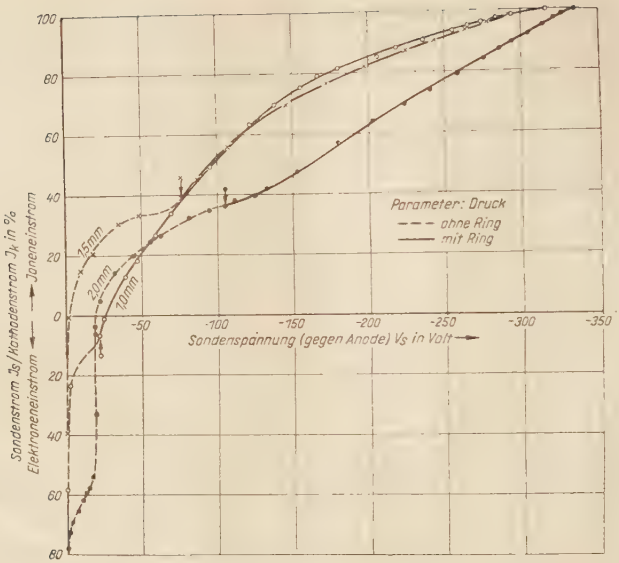
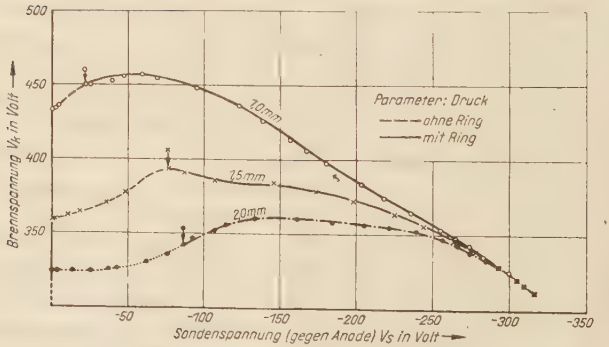


Fig. 6. a) Sondencharakteristiken
b) Brennspannungskurven
bei verschiedenen Drucken
Kathodenstromstärke: 20 mA
Plattenabstand: 10 mm



korrigiert und daher jetzt mit den beiden anderen (bei 1 und 1,5 mm gemessenen) unmittelbar vergleichbar ist [9]).

[9]) Auch für 1,5 mm Druck tritt für einige Kathodenstromstärken bereits ein Anodenfall auf, die zugehörigen Meßreihen sind hier jedoch nicht besonders wiedergegeben.

Vergleichen wir jetzt die Brennspannungskurven und die Sondencharakteristiken bei 2 mm Druck (Fig. 5) in ihrem Gesamtverlauf mit den schon früher besprochenen bei 1 mm Druck (Fig. 4), so zeigt sich, daß für 2 mm Druck die Ringe erst bei niedrigeren Stromstärken auftreten: Für 40 mA hat sich noch kein Ring ausgebildet, erst für 30 mA tritt ein Ring auf, während bei 1 mm Druck schon bei 60 mA Kathodenstrom Ringe zu beobachten sind. Des bequemeren Vergleichs wegen ist ferner in Fig. 6 bei einer bestimmten Kathodenstromstärke je eine Kurve für 1.0, 1.5 und 2.0 mm Druck aufgetragen, sodaß die Druckabhängigkeit der Erscheinung hier unmittelbar verfolgt werden kann: Wie man sieht, ist bei höherem Druck einerseits eine größere Sondenspannung nötig, um eine Unterteilung des Glimmlichts in Ringe zu bewirken, und zwar eine Sondenspannung von 21 Volt bei 1 mm, 76 Volt bei 1.5 mm, 86 Volt (Anodenfall!) bei 2 mm Druck und andererseits ist die maximale Brennspannungserhöhung für die 1.0-, 1.5-, 2.0 mm-Entladung bzw. von der Größe 24, 35 und 37 Volt. Aus der Betrachtung von Fig. 5 und 6 und ihrem Vergleich mit Fig. 4 ergeben sich also 3 wesentliche Abweichungen im Verhalten der 2 mm-Entladung gegenüber der 1 mm-Entladung:

1. Die Ringentladung tritt erst bei niedrigeren Stromstärken auf.
2. Bei derselben Kathodenstromstärke ist eine größere Sondenspannung nötig, um die Ringe hervorzurufen.
3. Der maximale Brennspannungsanstieg (radiales Feld) wird mit wachsendem Druck größer.

Die erste dieser drei Beobachtungen läßt sich schon allein auf Grund der Tatsache verstehen, daß die Dunkelräume mit zunehmendem Druck kleiner und mit abnehmender Stromstärke größer werden. Wollen wir also nach Verdoppelung des Drucks die gleiche Einengung des Glimmlichts (Ausbildung von Ringen) durch die Vergrößerung des Dunkelraums erzielen, so müssen wir die Stromstärke verkleinern.

Die Verkleinerung der Dunkelräume mit dem Druck können wir statt durch Erniedrigung der Kathodenstromstärke innerhalb eines gewissen Bereichs auch durch Vergrößerung der Sondenspannung wieder aufheben. Wenn also innerhalb eines Druckbereiches für eine bestimmte Kathodenstromstärke überhaupt Ringe auftreten, wird die zu ihrer Ausbildung nötige Sondenspannung bei höherem Druck größer sein.

Daß die maximale Brennspannungserhöhung (radiales Feld) mit steigendem Druck größer wird, bestätigt wieder den säulenartigen Charakter der Ringe; denn in der positiven Säule nimmt der Gradient mit wachsendem Druck zu. Darüber hinaus ist aber auch die Tatsache verständlich, daß diese Zunahme nicht gleich-

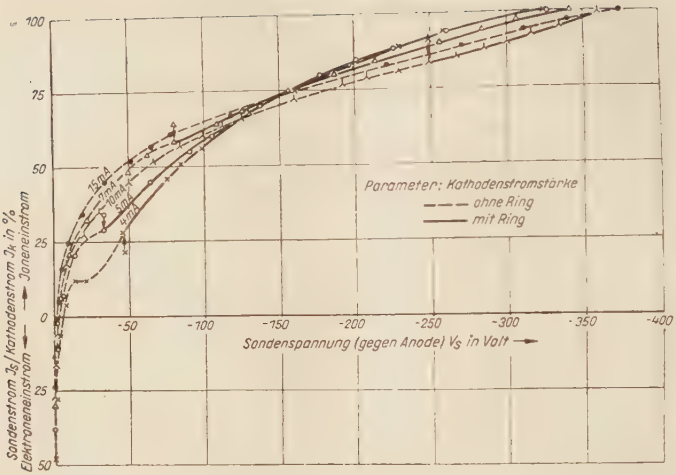
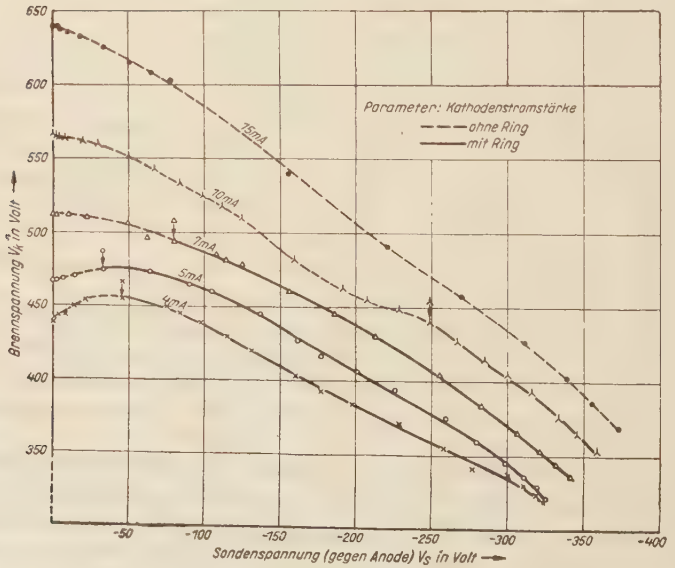


Fig. 7. a) Sondencharakteristiken

b) Brennspannungskurven
für verschiedene Kathodenstromstärken
Druck: 0,5 mm Hg, Plattenabstand: 20 mm



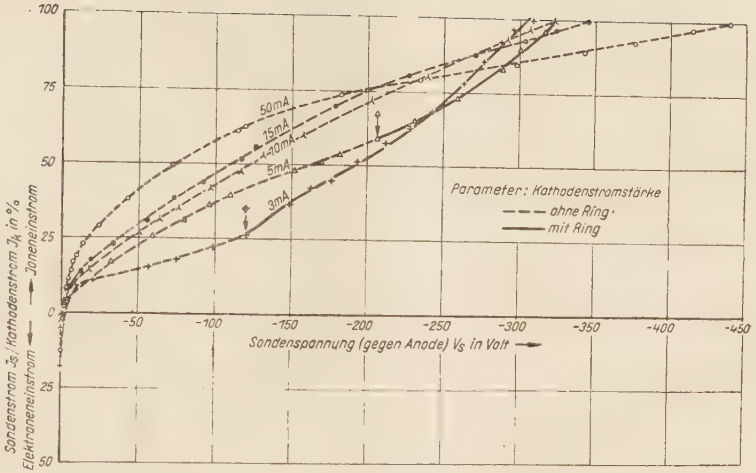
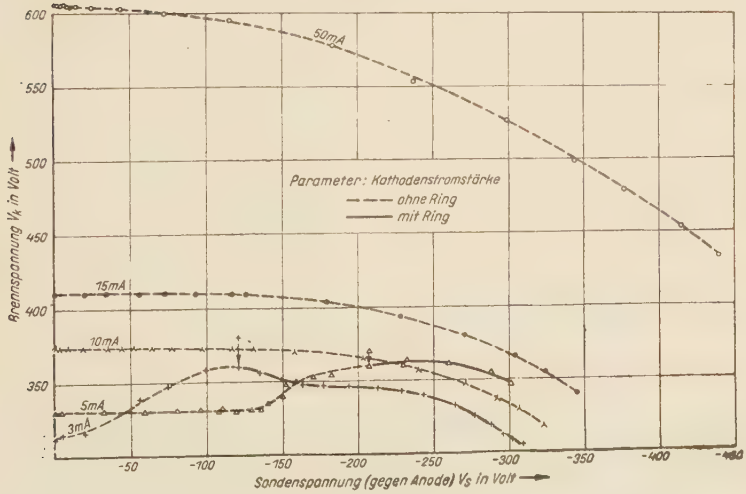


Fig. 8. a) Sondencharakteristiken
b) Brennspannungskurven
für verschiedene Kathodenstromstärken
Druck: 1 mm Hg, Plattenabstand: 20 mm



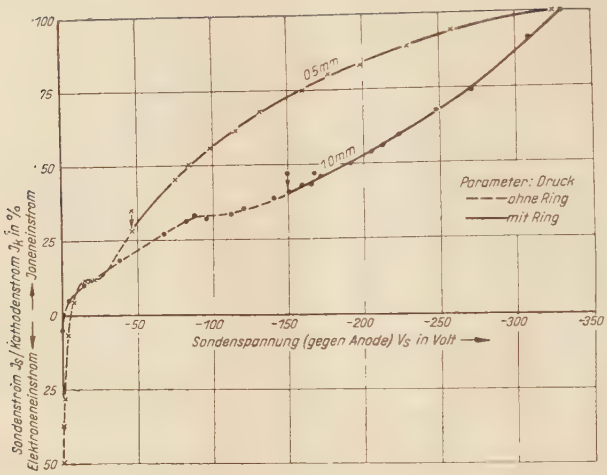
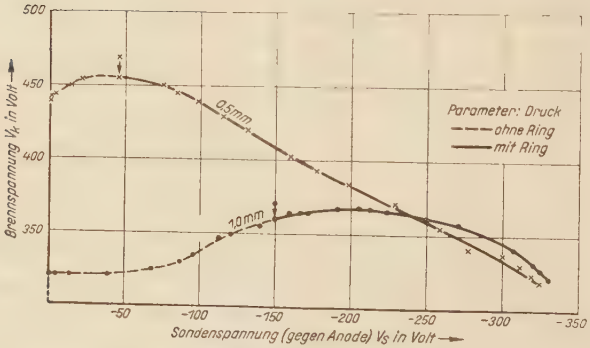


Fig. 9. a) Sondencharakteristiken
b) Brennspannungskurven
bei verschiedenen Drucken
Kathodenstromstärke: 4 mA
Plattenabstand: 20 mm



mäßig erfolgt, sondern mit wachsendem Druck zunächst schnell und dann langsamer. Bei gleicher Kathodenstromstärke verlagert sich nämlich mit wachsendem Druck die Ringbildung zu immer höheren Sondenspannungen, wobei der Hohlkathodeneffekt (Abfall der Brennspannungskurven) immer stärker wird, der dem Brennspannungsanstieg entgegenwirkt.

c) Verschiedener Abstand zwischen Sonde und Kathode (Plattenabstand).

In den Fig. 7, 8, 9 sind Sondencharakteristiken und Brennspannungskurven für einen Plattenabstand von 20 mm bei verschiedenen Kathodenstromstärken und verschiedenen Gasdrucken zusammengestellt. Schon ein kurzer Überblick zeigt, daß die Ringe für diesen doppelt so großen Plattenabstand erst bei viel kleineren Stromstärken auftreten, wie es nach der oben gegebenen Erklärung dieser Erscheinungen auch zu erwarten ist: Das Glimmlicht, in dem die langsamen Elektronen radial zur Anode wandern, hat nämlich bei Verdoppelung des Plattenabstands zunächst den doppelten Raum zur Verfügung. Erst die Herabsetzung der Stromstärke oder des Druckes hat (nach dem Langmuir-Schottky'schen Gesetz) eine genügende Ausdehnung der Dunkelräume und damit eine zur Ausbildung des Querfeldes (Ringbildung) ausreichende Einengung des Glimmlichts zur Folge. Darüber hinaus erkennt man bei Betrachtung der Fig. 7—9 in den Einzelheiten die gleichen Gesetzmäßigkeiten, die schon an Hand der Fig. 4—6 ausführlich besprochen worden sind:

Beim Übergang zu größeren Kathodenstromstärken hin verlagert sich das Auftreten der Ringe (Pfeil) nach höheren Sondenspannungen hin und schließlich treten keine Ringe mehr auf. Dieser auf Seite 12 und 13 erklärte Vorgang ist an den Kurven der Fig. 7 und 8 deutlich zu erkennen [10]): Bei Kathodenstromstärken von bzw. 5, 7 und 10 mA treten in Fig. 7 Ringe auf bei bzw. 30, 80, 250 Volt Sondenspannung, bei 15 mA ist keine Ringbildung mehr feststellbar. Entsprechendes gilt von Fig. 8.

Auch die Druckabhängigkeit der Erscheinungen ist die gleiche wie früher bereits auf S. 14 ff. ausführlich besprochen und erklärt. Der Vergleich von Fig. 7 (Druck 0,5 mmHg) mit Fig. 8 (Druck 1,0 mm Hg) sowie der unmittelbare Vergleich zweier Kurven bei gleicher Kathodenstromstärke aber verschiedenem Druck in Fig. 9 ergibt wie früher:

1. Die Ringentladung bildet sich erst bei niedrigen Stromstärken aus, wenn der Druck erhöht wird. So zeigt in dem untersuchten Bereich beim Druck 0,5 mm die 10 mA-Kurve Ringbildung, bei 1,0 mm Druck dagegen nicht die 10 mA-Kurve, sondern erst die 5 mA-Kurve.
2. Bei gleicher Kathodenstromstärke ist zur Ringbildung eine umso größere Sondenspannung notwendig, je größer der Druck ist.

[10]) Die 4 mA-Kurve in Fig. 7 a stimmt damit scheinbar nicht überein, jedoch fehlen Meßpunkte (vgl. Anm. 2 Seite 10) in dem Bereich, wo der Umschlag in die Ringentladung stattfindet. Vermutlich tritt der Ring für 4 mA schon bei etwa derselben Sondenspannung auf wie für 5 mA.

Nach Fig. 9 braucht man bei 0,5 mm Druck eine Sondenspannung von 40 Volt, bei 1,0 mm Druck unter sonst gleichen Bedingungen eine Sondenspannung von 160 Volt.

3. Der maximale Brennspannungsanstieg wird mit zunehmendem Druck auch hier größer: Bei 0,5 mm Druck beträgt er z. B. nach Fig. 9 etwa 15 Volt, bei 1,0 mm Druck etwa 45 Volt.

Die Erscheinungen bei einem Plattenabstand von 20 mm fügen sich also dem weiter oben entworfenen und ausführlich begründeten Gesamtbild der Entladungserscheinungen zwanglos ein, sodaß sich ein nochmaliges genaueres Eingehen auf diese Dinge hier erübrigt.

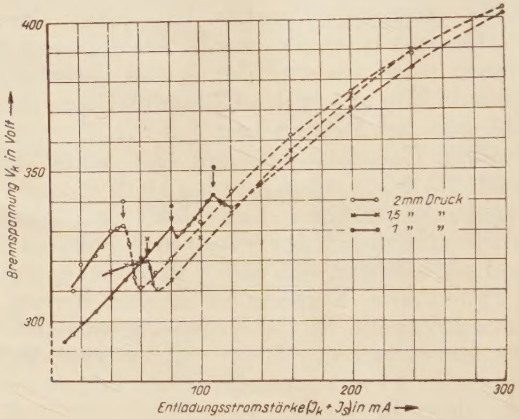


Fig. 10. Strom-Spannungscharakteristiken für verschiedene Drucke bei gleichem Potential an Kathode und Sonde (Plattenabstand: 10 mm)

Entladungscharakteristiken der Hohlkathode.

Zur Abrundung des im vorangehenden entworfenen Bildes über die Entstehung der sekundären Leuchterscheinungen im negativen Glimmlicht sollen hier zum Schluß noch einige Entladungscharakteristiken kurz beschrieben werden, d. h. also Kurven, bei denen die Brennspannung als Funktion der Entladungsstromstärke aufgetragen ist. Eine Sonderstellung unter diesen Kurven nehmen die „Hohlkathodencharakteristiken" ein, bei denen die Sonde auf Kathodenpotential liegt, sodaß also Sonde und Kathode zusammen eine „Hohlkathode" in dem zu Anfang dieser Arbeit (S. 2) ausführlicher besprochenen Sinne bilden. Eine solche

Charakteristik stellt gewissermaßen einen Querschnitt durch eine Schar von Brennspannungskurven bei verschiedenen Kathodenstromstärken dar (z. B. Kurvenschar in Fig. 4). Die Hohlkathodencharakteristiken bieten daher eine bequeme Übersicht über das Auftreten der untersuchten Leuchterscheinungen: Mit abnehmender Entladungsstromstärke fällt die Brennspannung zunächst monoton ab; bei weiterer Verkleinerung der Stromstärke tritt jedoch ein Spannungsanstieg auf, mit dem die Ausbildung einer oder mehrerer leuchtender Zonen im negativen Glimmlicht (Ringe) verbunden ist. Die Anzahl der beobachteten Ringe kann sich bei weiterer Erniedrigung der Entladungsstromstärke sprunghaft vergrößern, wobei in manchen Fällen (in Fig. 10 z. B. in der Kurve für 1 mm Druck) sich diese Änderung der Leuchterscheinung noch durch einen weiteren Spannungssprung bemerkbar macht. Der Spannungsanstieg (Ring) tritt dabei in Übereinstimmung mit den früheren Überlegungen bei umso größeren Entladungsstromstärken auf, je kleiner der Gasdruck ist, die Größe des Spannungssprungs dagegen wächst mit dem Gasdruck.

Die vorliegende Untersuchung wurde in der Zeit vom Februar 1935 bis Mai 1936 im Institut für theoretische Physik der technischen Hochschule Karlsruhe durchgeführt. Herrn Professor Weizel möchte ich auch an dieser Stelle für die Anregung zu dieser Arbeit und für sein stetiges förderndes Interesse an ihrem Fortgang meinen herzlichen Dank aussprechen. Ferner habe ich der Helmholtzgesellschaft, der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft und der Karlsruher Hochschulvereinigung für ihre Unterstützung zu danken.

Lebenslauf,

Am 2. Oktober 1911 wurde ich in Karlsruhe als Tochter des Professors Lukas Graf und seiner Frau Martha, geb. Weiß geboren. Ich bin katholischer Konfession und meine Großeltern sind deutscher Abstammung. Von 1921 bis 1927 besuchte ich in Bruchsal die Höhere Mädchenschule (später Mädchenrealschule), ab 1928 die Oberrealschule, an der ich 1930 die Reifeprüfung ablegte. Ostern 1930 bezog ich die Universität München zum Studium der Physik und Mathematik, das ich von 1931 an in Karlsruhe an der Technischen Hochschule fortsetzte. Das Studium wurde Januar 1935 in Karlsruhe mit der Staatsprüfung für das höhere Lehramt abgeschlossen. In den Jahren 1935 und 1936 arbeitete ich im Institut für theoretische Physik der Technischen Hochschule Karlsruhe. Seit Juni 1936 bin ich im Forschungsinstitut der AEG in Berlin.

Erika Graf.